

COMPORTAMIENTO AERODINAMICO DE BARRERAS CORTAVIENTOS (*)

LABORATORIO DE AERODINAMICA Y MECANICA DE FLUIDOS

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos

RESUMEN

El trabajo presenta resultados de la exploración del campo de velocidades en estelas de distintos modelos de barreras porosas, con vistas a su posible utilización para proteger plantaciones o zonas habitadas de los efectos perniciosos del viento.

Los ensayos se han hecho en túnel aerodinámico y, para las medidas, se ha utilizado un anemómetro de hilo caliente.

Se ha medido: la velocidad media temporal, el nivel de turbulencia y, en algunos casos, el transporte turbulento y la inclinación del vector velocidad, en cuatro secciones distintas corriente abajo de cada barrera.

El trabajo está dividido en ocho capítulos. En el primero se discute la posible utilidad de las barreras en agricultura. En el segundo se revisan ciertas características de las estelas turbulentas de diferentes obstáculos, con el fin de contrastar los resultados obtenidos con otros análogos. En el capítulo tercero se describen los métodos de medida. El cuarto presenta el grueso de los resultados, y los cuatro siguientes: la influencia del número de Reynolds, rugosidad del suelo, perfil del viento incidente y presencia de las paredes y techo del túnel, respectivamente.

Los ensayos muestran que los perfiles de velocidades correspondientes a secciones situadas a cierta distancia de la barrera (mayor de seis a ocho veces la altura de ésta) se asemejan a los de un semichorro de baja velocidad que descarga paralelamente a una corriente más rápida. Los perfiles próximos y las condiciones iniciales del semichorro dependen de la configuración de la barrera.

El modelo del semichorro equivalente permite calcular las características de la estela a distancias mayores que las que es posible reproducir en los experimentos. Por otra parte, sugiere ciertas modificaciones de la forma de la barrera para aumentar la longitud de la zona protegida del viento.

La rugosidad del suelo y la existencia de perfiles de viento distintos del uniforme y más ajustados a la realidad, contribuyen a disminuir la longitud de la zona protegida. Esta observación está de acuerdo con los resultados de otros autores.

Se observa que el nivel de turbulencia es muy sensible a las características geométricas de la barrera, lo que sugiere la posibilidad de controlar la capa límite sobre el terreno y, por tanto, el transporte de calor y masa en provecho de la productividad de cultivo.

El trabajo que se presenta es parte de un programa más amplio, que tiene por objeto transmitir tecnología avanzada a ciertos dominios de interés para la Agricultura y la Industria.

(*) Han contribuido a este trabajo: Ignacio Da-Riva, Domingo R. Manzano, Luis P. Bernal, Michel Magermans, Gregorio Resco, Antonio Rodríguez Pérez, Blas de la Rosa, Antonio Sánchez Súcar y Angel Viviente.

Los modelos utilizados para los ensayos han sido contruidos por: Antonio Gargallo, Julio Ester y Alonso Fernández.

Las figuras han sido preparadas por Juan M. Valero y Gonzalo Ortega.

El interés del estudio del comportamiento aerodinámico de las barreras, así como muchas ideas adicionales, fueron el resultado de conversaciones mantenidas con representantes de la firma de ingenieros consultores Geotech, S. A., que subvencionó la construcción de los primeros modelos. En especial, los autores agradecen su interés a Juan Martín Albo.

Este trabajo ha sido parcialmente subvencionado por la Comisión Nacional de Investigación Universitaria.

Uno de los autores (D. R. M.) disfrutó, durante la realización del trabajo, de una beca (de formación de personal investigador) de la Dirección General de Enseñanza Superior e Investigación.

BARRERAS CORTAVIENTOS

1. INTRODUCCIÓN.

El objeto de las barreras cortavientos es modificar la velocidad, dirección y nivel de turbulencia del viento.

Las referencias [1, 2] (*) revisan la experiencia existente sobre el uso de barreras vegetales en Agricultura. Dicho uso responde a una o varias de las exigencias siguientes:

- a) Proteger las plantaciones de los efectos mecánicos destructivos del viento.
- b) Proteger el terreno de la erosión.
- c) Estabilizar la nieve, la arena o áridos almacenados a la intemperie.
- d) Disminuir el transporte de calor y masa para modificar localmente las características ambientales.

De entre las ventajas atribuidas a las barreras formadas por árboles hay que distinguir las que se deben a la protección aerodinámica que proporcionan, de las debidas al carácter vegetal de tales barreras. Nos limitamos a considerar exclusivamente las primeras.

Desde el punto de vista aerodinámico, aparte de los efectos protectores obvios mencionados en los puntos a, b y c, es de esperar que las zonas protegidas por las barreras estén sometidas a transportes convectivos y difusivos menores que las no protegidas, con las siguientes consecuencias:

d.1) En el balance térmico: Al disminuir la velocidad en las proximidades del suelo, disminuye la difusión térmica vertical y, por tanto, la temperatura de las zonas protegidas es mayor durante el día y menor de noche que la de las no protegidas.

d.2) En la humedad ambiente: Por razones análogas, la barrera contribuye a disminuir la evaporación manteniendo, a veces con exceso, la humedad del suelo. Lo mismo ocurre con la transpiración de las hojas.

d.3) En la composición química del aire: Se podría pensar que la presencia de la barrera aumenta la concentración de CO_2 en las proximidades del suelo. La evidencia experimental parece indicar lo contrario. La explicación reside en que la cantidad

de CO_2 existente depende de los siguientes factores contrapuestos:

- 1. La cantidad aportada por la respiración del suelo, que actúa como "manantial" las veinticuatro horas del día. Dicha cantidad depende de la temperatura.
- 2. La cantidad asimilada por las plantas, que actúan de "sumidero" sólo durante el día, consumiendo unas tres veces lo que el suelo es capaz de aportar durante este tiempo.
- 3. Las cantidades introducidas y extraídas por convección y difusión.

De acuerdo con 2, es necesario que exista durante el día una aportación de CO_2 por convección y difusión, y, como la barrera entorpece el transporte, la zona protegida es deficitaria en CO_2 durante el día.

d.4) En lo relativo a la precipitación de lluvia, no parece estar claro qué parte se debe al terreno protegido y qué parte a los árboles protectores.

Independientemente de las ventajas que reportan las barreras vegetales, como son: protección de la radiación solar, aumento de la humedad ambiente, etc., presentan ciertas desventajas que, en ciertos casos, las hacen poco deseables. Algunas de tales desventajas son:

- a) Las barreras vegetales compiten con las plantaciones en la obtención de sustancias nutritivas, luz y humedad.
- b) El excesivo crecimiento de las raíces de los árboles que constituyen la barrera puede ser incompatible con los cultivos que se desea proteger.
- c) En muchos casos, para conseguir una protección aerodinámicamente eficaz, es necesario plantar varias filas paralelas de árboles a costa de inutilizar un área excesivamente grande.
- d) En ocasiones la instalación de la barrera es urgente y no es posible esperar al crecimiento de los árboles por rápido que sea.

Por estas razones, puede ser necesario instalar barreras artificiales de cañas, hormigón, tela metálica, plástico, etc.

Paradójicamente, los datos existentes sobre barreras artificiales son muy escasos, aunque se ha acumulado mucha información sobre estelas de cuerpos sumergidos en fluidos con el fin de conocer y modificar su resistencia aerodinámica.

El uso de las barreras cortavientos no se limita al campo de la Agricultura. Por ejemplo, en la referencia [3] se considera el comportamiento aerodinámico de distintos tipos de paredes perforadas, utilizadas para proteger barcos maniobrando o es-

(*) Los números entre corchetes caracterizan a las referencias ordenadas al final de cada capítulo.

tacionados en el puerto, o para proteger zonas habitadas. La referencia [4] presenta datos obtenidos con modelos de barreras destinadas a estabilizar mineral almacenado a la intemperie mientras que en [5] se discute el uso de barreras analogas para disminuir la erosión debida a los chorros de los reactores de aviones de despegue vertical y corto en terrenos situados en la proximidad de las pistas de despegue y aterrizaje que por razones economicas, no están preparados para soportar el efecto de tales chorros.

Las figuras 1-1, 1-2, 1-3 y 1-4 muestran fotografías, tomadas en las islas Canarias, de diversos tipos de barreras utilizadas en la actualidad (1).

2 OBJETO Y CONTENIDO DEL PRESENTE TRABAJO

El estudio, necesariamente experimental, del comportamiento aerodinámico de las barreras cortavientos, es un requisito previo a la instalación de dichas barreras en el campo. Con el fin de realizar dicho estudio experimental en condiciones satisfactorias de economía, controlabilidad y reproducibilidad, es necesario utilizar un túnel aerodinámico.

El objeto del presente trabajo es explorar las estelas de diferentes modelos de barreras cortavientos, situadas perpendicularmente al viento incidente. Las figuras 1-5, 1-6, 1-7 y 1-8 muestran algunos de los modelos utilizados en los ensayos.

Para explorar el campo de velocidades en la estela se ha utilizado un anemómetro de hilo caliente, cuyo fundamento operativo, juntamente con la somera descripción del túnel aerodinámico utilizado, se encuentra en el capítulo 3.

Las magnitudes medidas han sido:

1.º Velocidad media temporal en puntos seleccionados de la estela.

2.º Media cuadrática de la agitación debida a la turbulencia de la componente de la velocidad indicada anteriormente.

3.º En ciertos casos se ha medido el coeficiente de transporte vertical de componente horizontal de cantidad de movimiento (esfuerzos de Reynolds) y la inclinación media temporal de la velocidad. Dicha inclinación es pequeña, salvo muy cerca de la barrera.

El conocimiento de la velocidad media y la componente de agitación turbulenta permite estu-

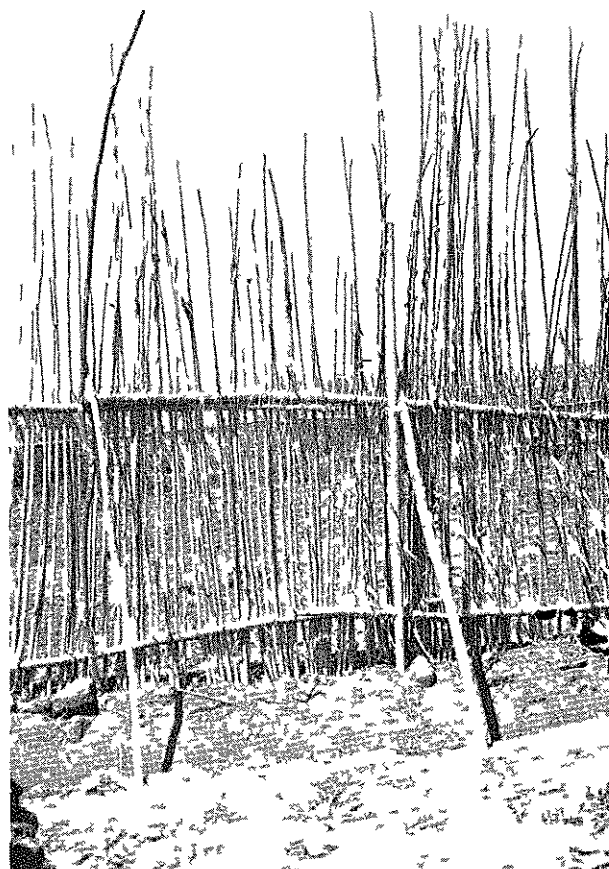


Fig 1-1 — Barrera de cañas

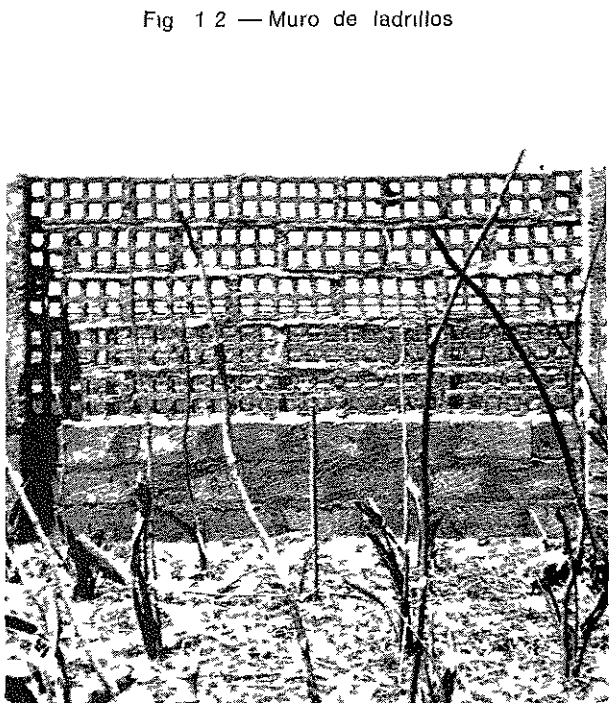


Fig 1-2 — Muro de ladrillos

(*) Los autores agradecen a Raul Romero, ingeniero agrónomo de TENO, S. A., la ayuda prestada a uno de ellos (D. R. M.) durante una visita realizada a Tenerife, con el fin de recoger información adicional sobre el terreno.

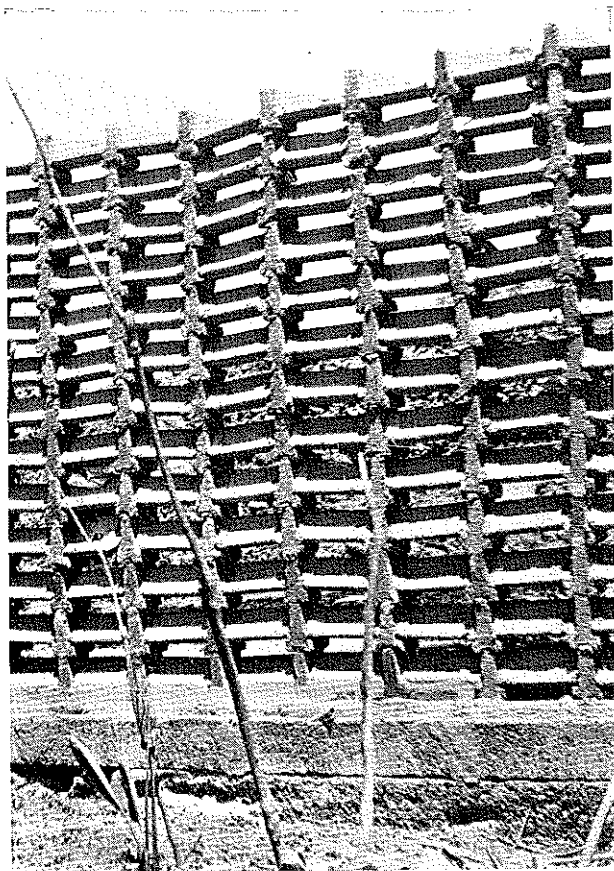


Fig. 1-3. — Muro "González del Carmen".

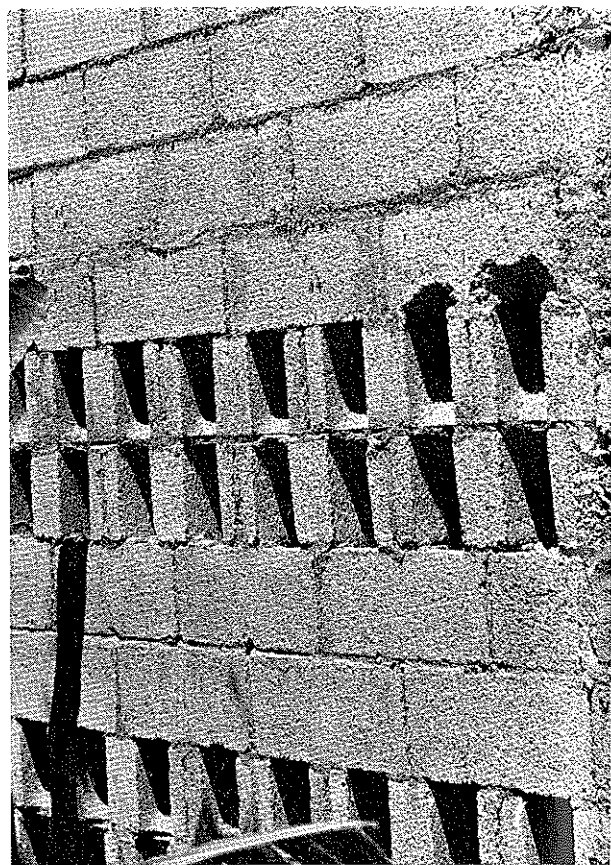
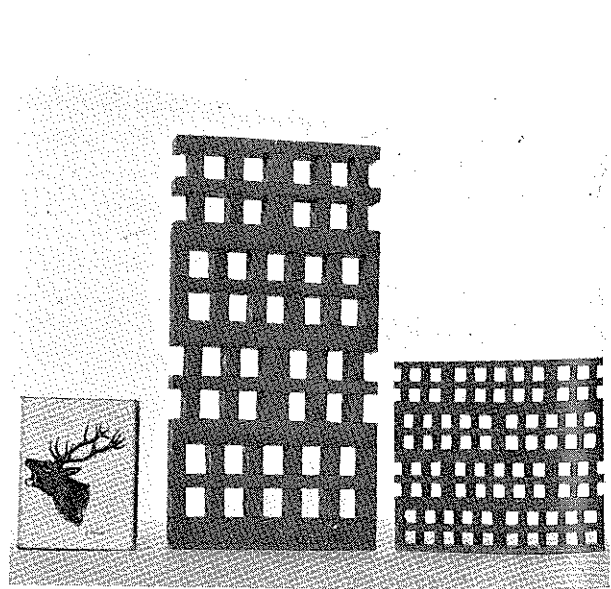
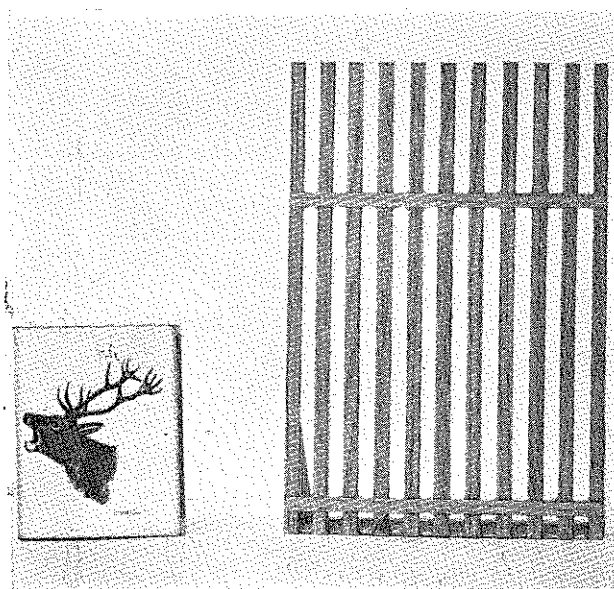


Fig. 1-4. — Muro "Columbia".

Fig. 1-5. — Modelo de barrera de cañas.

Fig. 1-6. — Modelos de muro de ladrillos.



diar los efectos mecánicos destructivos del viento, mientras que de los esfuerzos de Reynolds se deduce el transporte turbulento de calor y masa, cuyo conocimiento puede ser de interés para investigar la posibilidad de modificar las características ambientales locales en beneficio de la productividad del cultivo

La reproducción en túnel de las condiciones reales es, en general, extremadamente difícil y, de conseguirla con exactitud, disminuiría la generalidad de los resultados obtenidos

Si los únicos efectos de interés son los debidos a las fuerzas de inercia, viscosidad y presión del viento, es necesario [6] que el modelo sea geométricamente semejante a la barrera real y que se conserve el número de Reynolds. Si el aire del túnel está en las mismas condiciones físicas y químicas que el real, la conservación del número de Reynolds exige la igualdad del producto de la velocidad por la longitud característica de la barrera. Si el modelo es, por ejemplo, veinte veces menor que la barrera real, la velocidad del viento en los ensayos en túnel deberá ser veinte veces mayor que la posible velocidad real. Esto es imposible de conseguir y, como veremos en el capítulo 2, párrafo 1, no siempre es necesario. En general, el comportamiento aerodinámico de las barreras es independiente del valor del número de Reynolds, siempre que éste sea suficientemente grande. En el capítulo 5 se presentan datos relativos a la influencia del número de Reynolds en varias de las barreras consideradas

El segundo aspecto que es necesario comentar es el de la reproducción de la rugosidad del suelo y vegetación circundante. Se comprende que tratar de reproducir todos los posibles detalles de suelos muy diferentes, representa un esfuerzo grande y fuera de lugar. Lo que se ha hecho en el capítulo 6 es estudiar la influencia de rugosidades geométricamente sencillas, con el fin de valorar la sensibilidad de las diversas estelas a la rugosidad del suelo. En aquellos modelos cuyas estelas son poco sensibles a la rugosidad, los resultados del capítulo 4 son directamente aplicables, en aquellos muy sensibles, es aconsejable realizar ensayos en túnel adaptados a cada caso particular

El perfil del viento incidente, que en el túnel es uniforme y en la realidad no lo es, plantea un problema adicional. También aquí parece superfluo tratar de reproducir los más variados perfiles de viento, correspondientes a días calurosos, noches frescas, plantaciones próximas al mar, etc. En el capítulo 7 se ha reproducido, con cierto realismo, un perfil del viento, y se ha estudiado la sensibilidad de las barreras al viento incidente comparan-

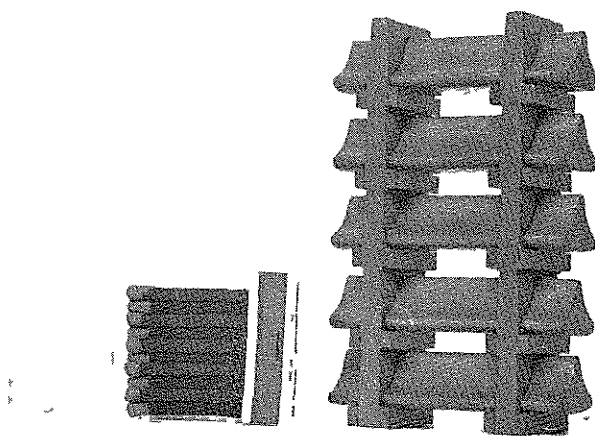
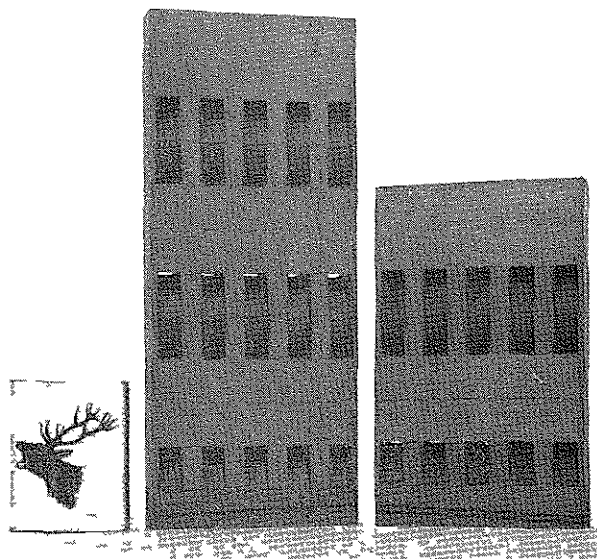


Fig 1-7 — Modelo de muro Gonzalez del Carmen

do las estelas correspondientes con las obtenidas con viento uniforme

En el capítulo 8 se estudia la posible interferencia de las estelas con las paredes de la cámara de ensayos del túnel. Se demuestra que el efecto es inapreciable, y se han construido modelos de menor tamaño, en aquellos casos en que pudiera haber sido notable

Fig 1-8 — Modelos de muro "Columbia"



Finalmente, es necesario observar que interesa conocer el comportamiento de la estela a distancias de la barrera mucho mayores que las que es posible reproducir en los experimentos. Dado que existen métodos semi-empíricos para el estudio de estelas lejanas, que serán presentados en el capítulo 2, párrafo 3, el problema queda zanjado si el perfil más alejado que se ha conseguido medir responde a la

ley semi-empírica prevista. En caso contrario, existe la posibilidad de encontrar expresiones analíticas suficientemente generales para los perfiles de velocidad correspondientes a secciones no muy alejadas, ya que la turbulencia se encarga de borrar los detalles excesivamente finos introducidos en las estelas por las diferentes barreras.

BIBLIOGRAFIA

1. VAN EIMERN, J.; KARSCHON, R.; RAZUMOVA, L.; ROBERTSON, G. W.: "Windbreaks and Shelterbelts". World Meteorological Organization. T.N. No. 59. Geneva, 1964.
2. KONSTANTINOV, A. R.; STRUZER, L. R.: "Shelterbelts and Crop Yields". Israel Program for Scientific Translations. Jerusalem, 1969.
3. VALENSI, J.; REBONT, J.: "Aérodynamique des parois perforées: Application au projet d'écrans de protection contre le vent; Etude du fonctionnement de ces écrans". Institut de Mécanique des Fluides de l'Université d'Aix-Marseille-France, 1959.
4. SHAFER, H. J.: "A Model Study of the Reduction of Wind Transport of Fine Particles by Aerodynamic Barriers". Proc. of the Fifth Israel Annual Conf. on Aviation and Astronautics, Jerusalem Academic Press Ltd., pp. 57-63, 1963.
5. ROGERS, K. H.; LAVI, R.; HALL, G. R.: "Experimental Investigations of Ground-Jet Suppression Fences for VTOL Aircraft Prepared Sites". J. Aircraft, t. Vol. 6, No. 3, pp. 245-251, May-June, 1969.
6. PARKER, J. D.; BOGGS, J. H.; BLICK, E. F.: "Introduction to Fluid Mechanics and Heat Transfer". Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Reading, Mass. Chap. 5, pp. 110-139, Mass. 1969.

ESTELAS

1. INTRODUCCIÓN.

Se forma una estela detrás de un obstáculo sumergido en un fluido, cuando existe un movimiento relativo del fluido respecto al obstáculo. Las velocidades en la estela, medidas respecto al obstáculo, son menores que la velocidad de la corriente exterior, y el déficit de cantidad de movimiento, a cierta distancia corriente abajo del obstáculo, es igual a la resistencia aerodinámica del mismo. Al aumentar la distancia al obstáculo, la estela se ensancha y simultáneamente disminuye la diferencia entre la velocidad en el exterior y en la estela.

Las estelas que consideraremos tienen las siguientes características comunes:

1.º Son bidimensionales. Las magnitudes fluidas son independientes de la coordenada perpendicular al plano en que se realizan las medidas.

2.º Son estacionarias. Las magnitudes fluidas en cada punto son independientes del tiempo. Como veremos más adelante, esto no pasa de ser una hipótesis simplificativa.

3.º La corriente exterior es ideal (no viscosa) y tanto la interior como la exterior son incompresibles.

4.º La corriente de la estela puede estar en régimen laminar, turbulento o transicional.

La estela se divide, de menor a mayor alejamiento del obstáculo, en las zonas siguientes:

- A) Base del obstáculo.
- B) Estela próxima.
- C) Estela alejada.

La figura 2-1 muestra la estructura de una estela bidimensional típica.

En condiciones de interés para el estudio de barreras cortavientos, las estelas son turbulentas. Con el fin racionalizar en lo posible el estudio de estelas turbulentas debidas a obstáculos distintos, es conveniente enunciar tres hipótesis que se cumplen con bastante aproximación en la práctica [1]. Dichas hipótesis juegan un papel fundamental en casi todas las teorías existentes sobre el movimiento turbulento.

La primera es la de independencia del número

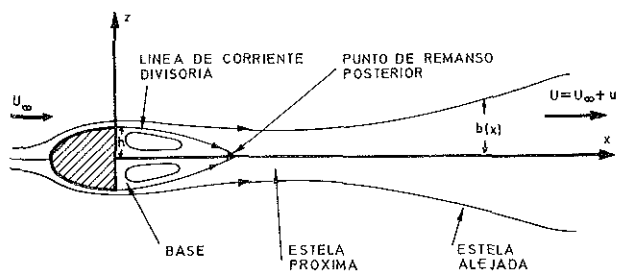


Fig. 2-1. — Estela de un obstáculo que se mueve a través de un fluido en reposo.

de Reynolds, supuesto suficientemente alto (*), y se expresa diciendo que basta adimensionalizar las longitudes con h y las velocidades con U_∞ para poder aplicar resultados obtenidos con unas barreras, a otras geoméricamente semejantes y con velocidades de viento distintas de las del ensayo. La hipótesis no es aplicable a las zonas en las que el número de Reynolds del movimiento turbulento local no sea grande.

La segunda hipótesis es la de semejanza, que indica que, a cualquier número de Reynolds, la configuración de la corriente, en los distintos planos perpendiculares a la dirección del viento incidente, es semejante. Esta hipótesis es equivalente a afirmar que la corriente tiende a aproximarse a una configuración de equilibrio dependiente de las condiciones iniciales.

La tercera hipótesis es un corolario de la anterior. Se puede esperar que la configuración de la corriente a gran distancia no sea excesivamente sensible a los pequeños detalles de las condiciones iniciales y que, por tanto, las estelas alejadas de obstáculos semejantes sean muy semejantes.

Se acostumbra a valorar las dos primeras hipótesis considerando la estela de un cilindro circular de longitud infinita cuyas generatrices son perpendiculares a la corriente incidente [2].

La hipótesis de independencia se cumple si el número de Reynolds, basado en el diámetro d del cilindro, es mayor de 800. El que no se cumpla de forma absoluta se debe a que la viscosidad influye en el desarrollo y desprendimiento de la capa límite en el cilindro, y esta capa límite, dependiente del número de Reynolds, configura la estela próxima. En el caso de obstáculos con aristas, o si la capa

(*) Salvo que se indique lo contrario, se define el número de Reynolds de la forma siguiente:

$$R_e = \frac{U_\infty h \rho}{\mu},$$

donde U_∞ es la velocidad de la corriente no perturbada, h la altura del obstáculo y ρ , μ densidad y viscosidad del fluido, respectivamente.

límite es turbulenta, el punto de desprendimiento es independiente del número de Reynolds y la hipótesis de independencia es apropiada prácticamente en cualquier caso.

Se comprueba que la hipótesis de semejanza es válida para distancias mayores de 90 d , en lo relativo a velocidad media (temporal) y ensanchamiento de la estela. La semejanza en la estructura detallada de la turbulencia requiere distancias mucho mayores (500 d -1.000 d).

Finalmente, los experimentos [3] demuestran que las estelas turbulentas lejanas de obstáculos distintos son semejantes, y es posible encontrar leyes universales para la distribución de velocidades y el ensanchamiento de la estela, si se adimensionalizan las longitudes con $C_D h$ (*) y las velocidades con U_∞ . Esto parece estar de acuerdo con la tercera de las hipótesis enunciadas.

El estudio de la estela próxima es muy complicado, pues la configuración de la corriente depende de la forma del obstáculo a través de múltiples parámetros. Por el contrario, las estelas alejadas pueden ser estudiadas de forma analítica o semianalítica, aprovechando las ventajas derivadas del cumplimiento aproximado de las hipótesis ya mencionadas.

Se comprende que, con el fin de disminuir el trabajo experimental, es importante conocer, para cada barrera, la distancia a partir de la que se cumple la hipótesis de semejanza, al menos en cuanto a velocidad media y ley de ensanchamiento de la estela.

La referencia [4] estudia un caso ligeramente parecido al de las barreras cortavientos porosas, que consideraremos más adelante; se trata de un chorro axil-simétrico que descarga paralelamente a una corriente exterior más veloz que el chorro. La comparación de las medidas con una teoría fundada en la existencia de semejanza, lógicamente válida lejos de la sección de salida del chorro, conduce a las conclusiones siguientes:

a) En lo relativo a los perfiles transversales de velocidad y a la variación del déficit de velocidad a lo largo del eje del chorro, la hipótesis de semejanza parece ser válida, a partir de distancias del orden de tres veces el radio inicial del chorro, para relaciones de velocidades de la corriente exterior a la de descarga del chorro comprendidas entre 3.4 y 39.5.

(*) C_D es el coeficiente de resistencia del obstáculo

$$C_D = D / \frac{1}{2} \rho U_\infty^2 h$$

donde D es la resistencia aerodinámica del obstáculo por unidad de envergadura (normal al plano en que se realizan las medidas).

b) Por el contrario, los esfuerzos turbulentos medidos son notablemente inferiores a los calculados. El error disminuye, sin que los resultados sean del todo satisfactorios, al considerar secciones del chorro distantes 42 veces el radio inicial del chorro y relaciones de velocidades del orden de 3.4.

Aunque, como se ha mencionado, dentro de las condiciones que vamos a considerar es imposible conseguir que la estela sea laminar, el estudio de estas últimas tiene un interés conceptual, pues admiten un tratamiento analítico razonablemente riguroso. Por el contrario, el tratamiento clásico de las estelas turbulentas es semi-empírico en el sentido de que se apoya en las ecuaciones del movimiento y en datos empíricos sobre las distribuciones de velocidades medias (temporales) y ley de ensanchamiento de la estela.

2. ESTELA ALEJADA LAMINAR. APROXIMACIÓN DE OSEEN.

Se podría pensar en analizar la estela laminar utilizando las ecuaciones de Navier-Stokes, pero dado que no son lineales, es necesario recurrir a aproximaciones.

En aquellos problemas en los que la velocidad difiere poco de U_∞ en ciertas zonas del fluido, se puede utilizar la linealización de Oseen [5], que consiste en suponer que cualquier propiedad, en particular la cantidad de movimiento, no es transportada con la verdadera velocidad local, sino con la velocidad U_∞ .

Es lógico esperar que las ecuaciones resultantes sean aproximadamente válidas a gran distancia del obstáculo donde la velocidad de perturbación es pequeña comparada con U_∞ . Además, si los efectos de viscosidad son importantes (R_e pequeño) las ecuaciones son también válidas cerca del obstáculo porque allí dominan los términos viscosos que no son falseados por la aproximación de Oseen.

Una vez linealizadas las ecuaciones del movimiento, es posible superponer linealmente soluciones. Dos *soluciones fundamentales* de las ecuaciones de Oseen dan la respuesta del fluido a una fuerza singular concentrada en el origen. Si la fuerza es paralela a la corriente incidente tenemos, en movimiento bidimensional, lo que Lagerstrom llama "placa plana singular". Si la fuerza es normal tenemos el "elemento sustentador singular". El campo de velocidades está dado en ambos casos en [5].

Para la "placa plana singular", la velocidad de perturbación a gran distancia es, salvo un factor constante:

$$u(x, z) = - \frac{1}{4 \sqrt{\pi \rho \mu U_\infty r}} \left(1 + \frac{x}{r} \right) e^{-\frac{\rho U_\infty}{2 \mu} (r-x)} \quad (1)$$

$$w(x, z) = - \frac{1}{4 \sqrt{\pi \rho \mu U_\infty r}} \left(\frac{z}{r} \right) e^{-\frac{\rho U_\infty}{2 \mu} (r-x)}, \quad (2)$$

donde:

$$r^2 = x^2 + z^2.$$

El valor de $e^{-\frac{\rho U_\infty}{2 \mu} (r-x)}$ es constante a lo largo de las curvas $\frac{\rho U_\infty}{2 \mu} (r-x) = K$, que son parábolas de foco en el origen y cuya concavidad está dirigida en sentido de las x crecientes. Más allá de la parábola correspondiente a un valor suficientemente grande de K , las velocidades de perturbación son despreciables.

Cuando $z \ll x$, es decir, cerca del eje de la estela, la expresión (1) se reduce a:

$$u(x, z) \simeq - \frac{1}{2 \sqrt{\pi \rho \mu U_\infty x}} e^{-\frac{\rho U_\infty}{4 \mu} \frac{z^2}{x}}, \quad (1 a)$$

mientras que w es nula.

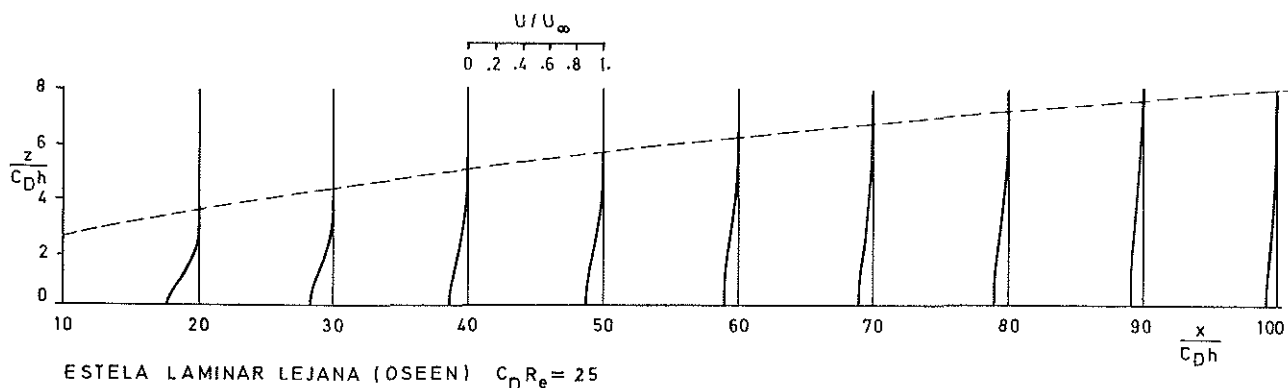
La figura 2-2 representa la distribución de velocidades en una estela laminar alejada, de acuerdo con la aproximación de Oseen.

El déficit de cantidad de movimiento, en la estela vale:

$$D = - \rho U_\infty \int_{-\infty}^{\infty} u(x, z) dz = 1.$$

Conocidas las soluciones fundamentales podemos, por superposición, obtener la estela laminar alejada correspondiente a cualquier cuerpo. Si el cuerpo no sustenta recurriremos exclusivamente a soluciones fundamentales del tipo "placa plana singular". Para puntos de la estela cuya distancia al cuerpo sea mucho mayor que la longitud caracterís-

Fig. 2-2.—Distribución de velocidades en la estela laminar lejana, según Oseen. $C_D R_e = 25$.



tica de éste, el campo de velocidades resulta de la superposición de las soluciones correspondientes a diversas "placas planas singulares", situadas todas ellas en el mismo punto, y de forma que la intensidad de la fuerza sea igual a la resistencia, D , del obstáculo.

Las estelas laminares alejadas conservan memoria del obstáculo que las ha producido a través de la resistencia de éste. La distribución de velocidades de perturbación es universal si se adimensionalizan las longitudes con h/R_e y las velocidades con $C_D R_e U_\infty$.

3. ESTELA ALEJADA TURBULENTO. TEORÍA DE SCHLICHTING.

En condiciones análogas a las existentes en los experimentos que discutiremos (fluido incompresible, $R_e \approx 10^4$) las estelas son turbulentas.

La teoría de las estelas bidimensionales turbulentas, que se debe a Schlichting y puede ser estudiada con cierto detalle en [3, 6], se refiere exclusivamente a la estela alejada ($x > 180 h$), y proporciona valores medios temporales de la velocidad en cada punto y anchura de la estela en cada sección. No es apropiada para obtener detalles excesivamente precisos de la estructura de la turbulencia, ni de la intermitencia que aparece en la estela exterior cuando la corriente no perturbada es laminar.

Los resultados fundamentales de dicha teoría son:

a) La anchura, b , de la estela crece de acuerdo con la ley:

$$b = k \sqrt{x}, \quad (3)$$

donde k es una constante empírica que, según los experimentos de Schlichting y Reichardt, vale:

$$k = 0.8 \sqrt{C_D h}$$

b) La velocidad de perturbación en el eje de la estela vale:

$$u(x; 0) = -1.4 U_\infty \sqrt{\frac{C_D h}{x}} \quad (4)$$

c) La distribución transversal de velocidad de perturbación se aproxima a la expresión:

$$\frac{u(x; z)}{u(x; 0)} = \left[1 - \left(\frac{z}{b(x)} \right)^2 \right]^2 \quad (5)$$

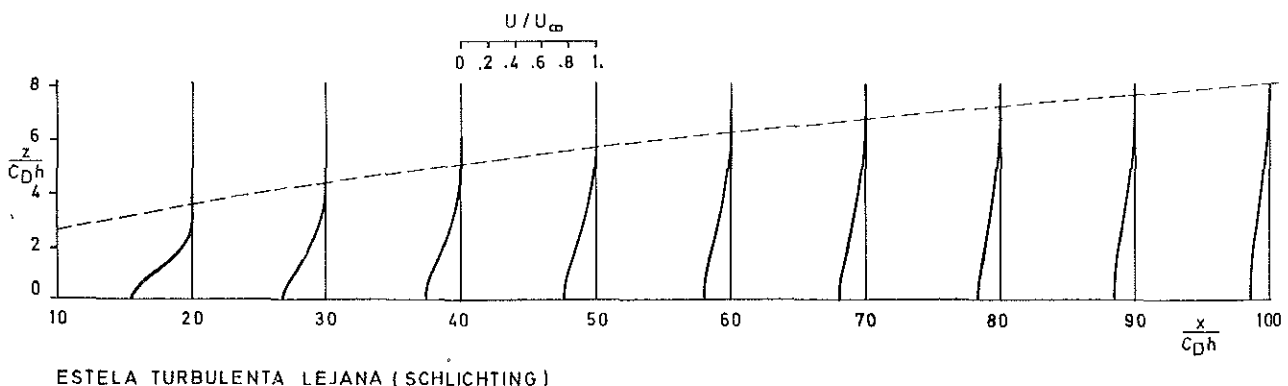
La figura 2-3 representa la distribución de velocidades en una estela turbulenta alejada, de acuerdo con la teoría de Schlichting.

De las expresiones (3), (4) y (5) se deduce que: *Las estelas turbulentas alejadas de diferentes obstáculos son semejantes.* La distribución de velocidades es universal si se adimensionalizan las longitudes con $C_D h$ y las velocidades con U_∞ .

4. ESTRUCTURA DE LA TURBULENCIA EN LA ESTELA.

Es sabido que a números de Reynolds grandes el campo de velocidades de la estela es inestable y el movimiento deja de ser laminar u ordenado para

Fig. 2-3. — Distribución de velocidades en la estela turbulenta lejana, según Schlichting.



pasar a turbulento. Un movimiento turbulento está caracterizado por el hecho de que las diversas magnitudes presentan una variación aleatoria en el espacio y en el tiempo.

La característica fundamental del movimiento turbulento es su eficacia disipadora e igualadora de propiedades. Si no existe una fuente continua generadora de turbulencia, ésta tiende a amortiguarse y a hacerse homogénea e isotrópica. Tal cosa ocurre corriente abajo de una tela metálica de malla suficientemente fina, colocada perpendicularmente a la corriente.

En las estelas, en las que la velocidad media temporal presenta un gradiente que suministra la energía para el movimiento turbulento, existe simultáneamente generación y disipación de turbulencia. La generación de turbulencia está determinada por el gradiente de velocidad media, que a su vez depende de la turbulencia generada corriente arriba y transportada por convección y difusión. Esta dependencia conduce a la semejanza entre los perfiles de las diferentes secciones de la estela.

Parece lógico pensar que se cumpla, para las es-

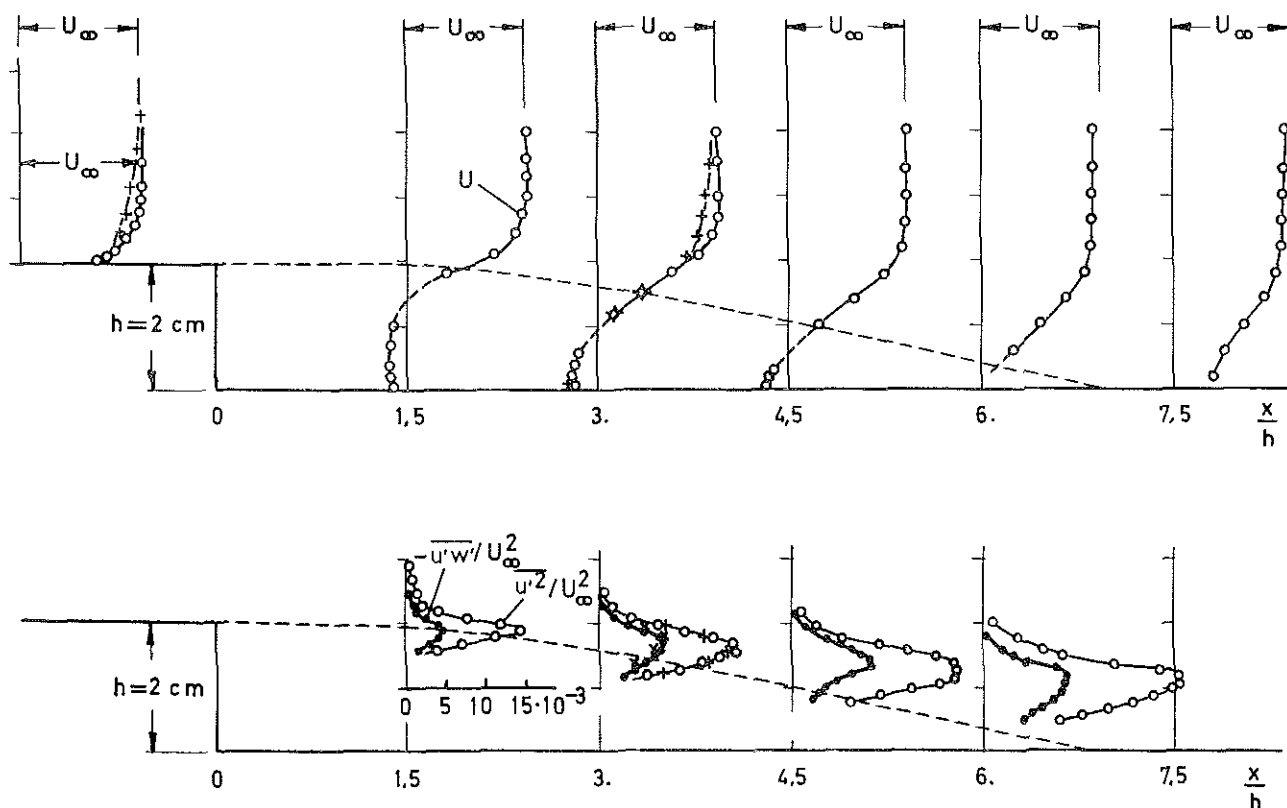
telas, la hipótesis de semejanza, dado que presentan las tres características siguientes: 1.^a La zona turbulenta es normalmente estrecha. 2.^a La componente longitudinal de la velocidad es mucho mayor que las transversales. 3.^a Las propiedades varían menos acusadamente en la dirección del movimiento medio que en dirección transversal. Debido a esto, se puede suponer que una configuración turbulenta casi invariable es arrastrada en la dirección del movimiento medio.

Es interesante, antes de avanzar, discutir ciertos resultados experimentales relativos a configuraciones análogas a las que consideraremos más adelante.

Las figuras 2-4, 2-5 y 2-6, sacadas de [7], representan velocidades medias U , intensidades de turbulencia $\overline{u'^2}/U^2_\infty$, y esfuerzos turbulentos $-\overline{u'w'}/U^2_\infty$, medidos detrás de un escalón descendente. En estas y sucesivas figuras, u' y w' son las componentes longitudinal y transversal, respectivamente, de la velocidad de fluctuación turbulenta.

Se comprueba la existencia de una zona de recirculación, situada detrás del escalón, cuya longitud es unas siete veces la altura de éste. La configu-

Fig. 2-4. — Distribución de velocidades, fluctuaciones turbulentas y esfuerzos de Reynolds en la estela de un escalón, según Tani, Iuchi y Komoda [7].



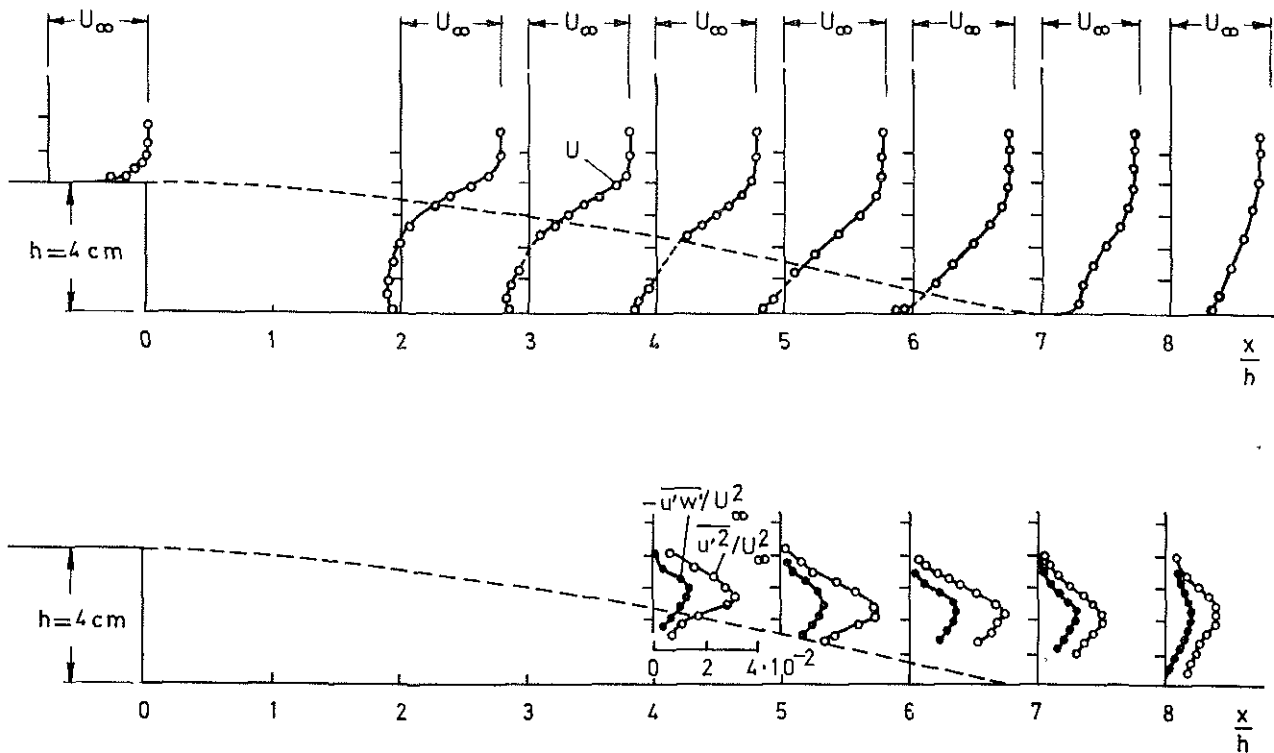
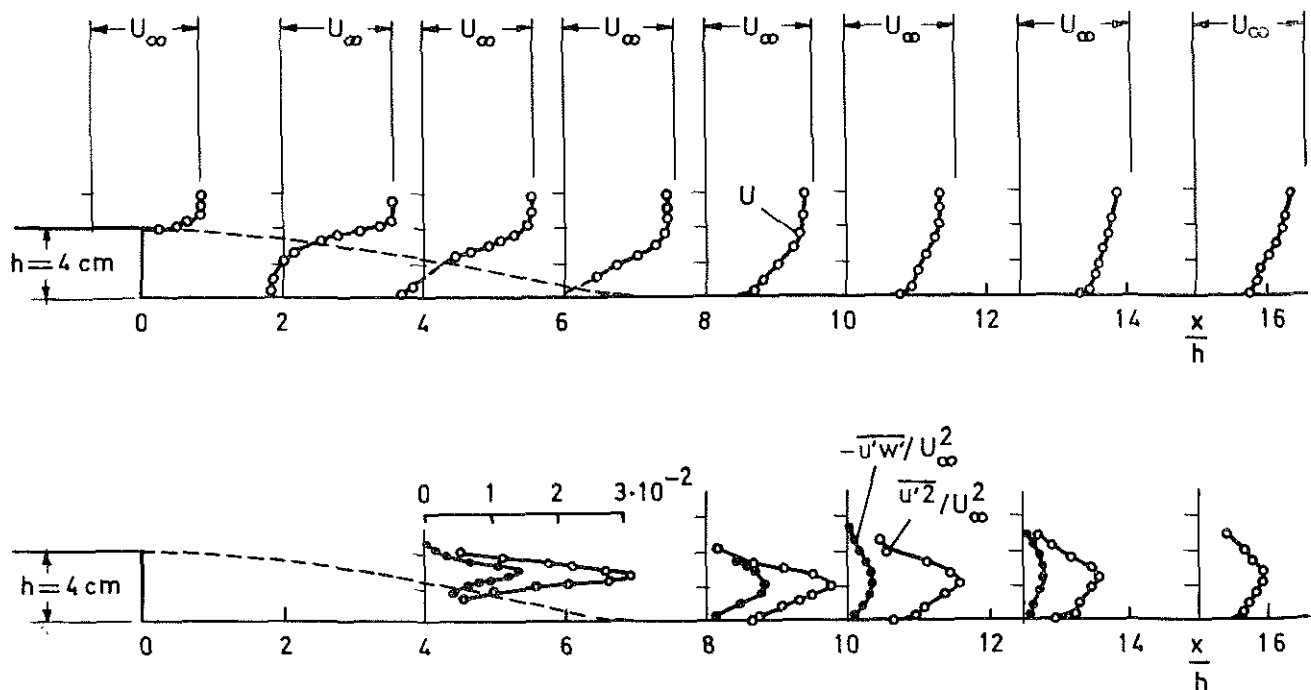


Fig. 2-5. — Distribución de velocidades, fluctuaciones turbulentas y esfuerzos de Reynolds en la estela de un escalón, según Tani, Iuchi y Komoda [7].

Fig. 2-6. — Distribución de velocidades, fluctuaciones turbulentas y esfuerzos de Reynolds en la estela de un escalón, según Tani, Iuchi y Komoda [7].



ración resultante es muy insensible a la altura del escalón, y a las características de la capa límite incidente, salvo probablemente para escalones muy bajos. También se ve que la máxima intensidad de turbulencia coincide, en las secciones iniciales, con la posición del máximo gradiente de velocidad media, mientras que en las proximidades del punto de readherencia, la zona de máxima turbulencia se desplaza hacia el exterior. En la figura 2-6, que presenta medidas realizadas a distancias del escalón mayores que las correspondientes a las figuras anteriores, se ve que la turbulencia producida en la zona de recirculación se disipa corriente abajo del punto de readherencia, pero aparece nueva turbulencia generada por la capa límite que nace en dicho punto.

En el extremo opuesto, la figura 2-7, sacada de [8], muestra las mismas variables en la estela de una placa plana paralela a la corriente incidente, con capa límite turbulenta. El número de Reynolds, basado en el espesor convencional ($U/U_\infty = 0,99$) de la capa límite, vale $1,5 \times 10^4$. Las longitudes se adimensionalizan con el espesor de impulso, $\theta = 0,58$ cm., en el borde de salida de placa. Se observa que la zona de máxima intensidad turbulenta coincide con la de máximo gradiente de velocidad, pero, contrariamente a cuanto ocurría en el caso anterior, la ausencia de turbulencia adicional en el borde de salida contribuye a que la estela se desarrolle muy gradualmente, conservando, incluso muy lejos, ciertas características de la capa límite sobre la placa.

5. INTERMITENCIA.

En aquellas configuraciones, como las de las figuras 2-1, 2-2, 2-3 y 2-7, en que no existe capa límite en el eje de la estela, por no haber suelo, la fluctuación turbulenta es bastante uniforme en el interior de la estela y disminuye bruscamente en la frontera exterior. Townsend [9] fue el primero en sugerir que la turbulencia es prácticamente homogénea en una región mucho más amplia que la puramente interior, y que la disminución de la fluctuación en las proximidades de la frontera es aparente y se debe a la presencia intermitente de zonas fluidas laminares y turbulentas, como las indicadas en la figura 2-8.

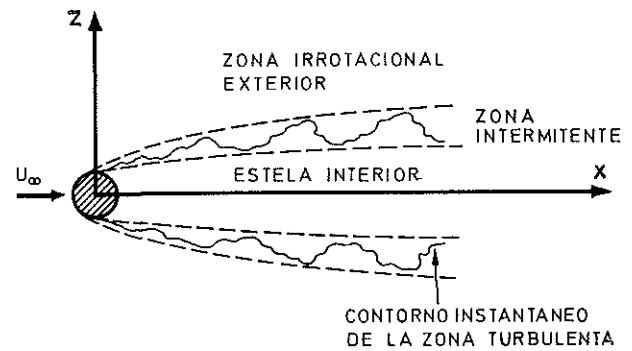
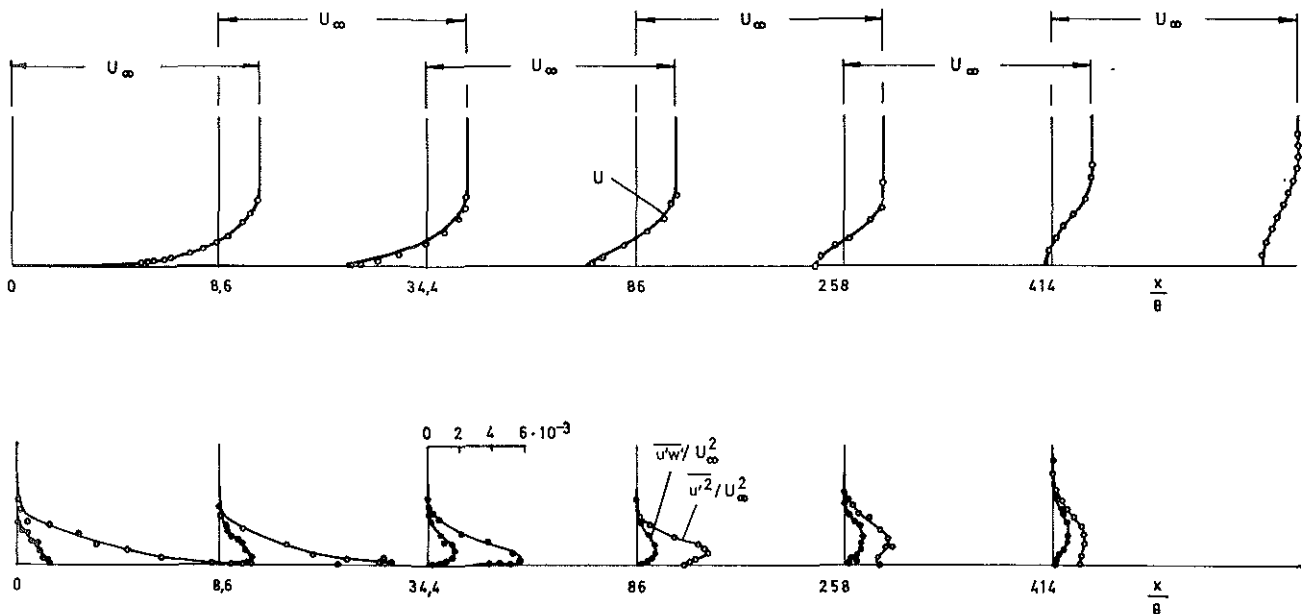


Fig. 2-8. — Contorno intermitente de la zona turbulenta, según Townsend [9].

Fig. 2-7. — Distribución de velocidades, fluctuaciones turbulentas y esfuerzos de Reynolds en la estela de una placa plana con ángulo de ataque nulo, según Chevray y Kovaszny [8].



La configuración de la corriente responde al siguiente modelo simplificado:

1.º El fluido en régimen turbulento está limitado por superficies que se deforman debido, por una parte, a la velocidad inducida por masas turbulentas de dimensión comparable con la anchura de la zona fluida sometida a esfuerzos medios del mismo signo y, por otra, al arrastre de la corriente exterior.

2.º El fluido exterior se mueve, irrotacionalmente, perturbado por la deformación de la superficie de separación.

3.º Excepto en las proximidades de la frontera, donde tiene lugar el arrastre de fluido exterior, la intensidad de la turbulencia es casi constante. Esto es debido a que la escala de la turbulencia es pequeña, y los tiempos de generación y disipación son comparables al tiempo característico del movimiento medio.

4.º Las masas fluidas que deforman la superficie de separación existente entre la zona turbulenta y la exterior, tienen su vorticidad central en la dirección y sentido del eje principal de la deformación media positiva; tienen su máxima dimensión en la dirección del movimiento medio, y su centro está situado en la zona de máxima variación del esfuerzo cortante turbulento medio. Su tiempo de vida es del orden del tiempo característico del movimiento medio.

5. CORRIENTE EN LA BASE DEL OBSTÁCULO. INFLUENCIA DE LA INYECCIÓN.

Sabemos que cuando la menor dimensión de la base de un obstáculo móvil en un fluido, es mucho mayor que el espesor de la capa límite incidente, se forma detrás de la base una zona de recirculación como las dibujadas en las figuras 2-1, 2-4, 2-5 y 2-6. La resistencia aerodinámica del obstáculo depende parcialmente de la presión en la base y, por tanto, de la estructura de la zona de recirculación. En el caso de una barrera cortavientos, la zona de recirculación es la que está más protegida del viento.

Se aumenta la longitud de la zona de recirculación, inyectando desde la base del obstáculo una cantidad relativamente pequeña de fluido. El problema ha sido considerado con cierto interés [10], porque con la inyección desde la base se disminuye la resistencia de presión de ciertos perfiles de ala truncados que, por carecer de toda la zona próxima

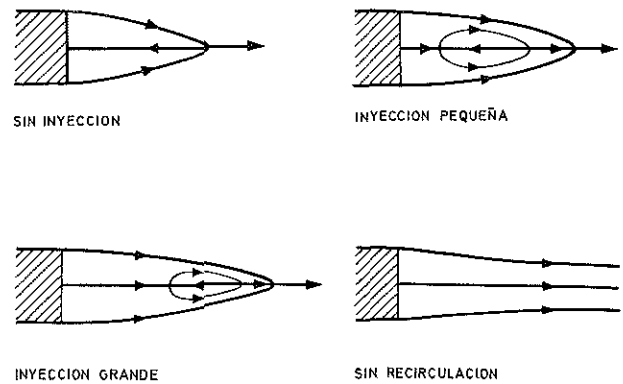


Fig. 2-9. — Representación esquemática de la influencia de la inyección desde la base en la zona de recirculación.

al borde de salida de los perfiles ortodoxos, tienen una resistencia de rozamiento pequeña.

La figura 2-9 representa, muy esquemáticamente, una estela con varios grados de soplado. Si el impulso de la corriente inyectada es excesivamente grande, la zona de recirculación desaparece y la estela se convierte en chorro.

Las barreras cortavientos son normalmente porosas para poner en contacto la alta presión de la zona anterior con la baja de la zona de recirculación, e inyectar de esta forma fluido en la estela.

La porosidad geométrica de una barrera (complementaria de la solidez) es el cociente entre el área de las aberturas y el área de la sección frontal. Es difícil fijar la porosidad geométrica óptima; los valores aconsejables oscilan entre 0,4 y 0,6. Estos últimos presentan la ventaja adicional de la economía constructiva [11].

Se comprende fácilmente que la porosidad geométrica por sí sola no es un índice de la cantidad de movimiento inyectada en la estela, y que dos barreras con la misma porosidad, pero aberturas distribuidas de distinta forma, pueden comportarse muy diferentemente. Por ejemplo: algunos autores recomiendan el uso de barreras con mayor porosidad en la parte baja, mientras que otros abogan por aumentar la porosidad de la parte alta de la barrera. Es difícil juzgar quién tiene razón, pero hay que observar que el comportamiento de barreras de gran porosidad en la parte inferior depende mucho de la rugosidad del suelo y de las características de la capa límite incidente, variables que, muchas veces, no son tenidas en cuenta al comparar ensayos de diferentes autores.

BIBLIOGRAFIA

1. TOWNSEND, A. A.: "The Structure of Turbulent Shear Flow". Cambridge Monographs on Mechanics and Applied Mathematics. Cambridge University Press. Chap. 3, pp. 32-43, 1956.
2. HINZE, J. O.: "Turbulence". McGraw-Hill Book Company, Inc. Chap. 6, pp. 393-404, New York, 1959.
3. ABRAMOVICH, G. N.: "The Theory of Turbulent Jets". The M.I.T. Press. Chap. 3, pp. 126-133, Cambridge, Mass. 1963.
4. DONOVAN, L. F.: "Similarity Solution for Turbulent Mixing between a Jet and a Faster Moving Coaxial Stream". NASA, TN, D-4441, March 1968.
5. LAGERSTOM, P. A.: "Laminar Flow Theory". High Speed Aerodynamics and Jet Propulsion. Vol. 4. F.K. Moore Ed. pp. 88-102. Princeton, N.J., 1964.
6. SCHLICHTING, H.: "Boundary Layer Theory". McGraw-Hill Book Company, Inc. Chap. XXIII, pp. 594-596, New York, 1960.
7. TANI, I.; IUCHI, M.; KOMODA, H.: "Experimental Investigation of Flow Separation Associated with a Step or a Groove". Aeronautical Research Institute. University of Tokyo. Report No. 364, 1961.
8. CHEVRAY, R.; KOVASZNY, L. S. G.: "Turbulence Measurements in the Wake of a Thin Plate". AIAA Journal. Vol. 7, No. 8, pp. 1641-1643, 1969.
9. TOWNSEND, A. A.: "The Structure of Turbulent Shear Flow". Cambridge University Press. Chap. 5, pp. 100-112, 1956.
10. WOOD, C. J.: "Visualization of an Incompressible Wake with Base Bleed". J. Fluid Mech. Vol. 29, part. 2, pp. 259-272, 1967.
11. VAN EIMERN, J.; KARSCHON, R.; RAZUMOVA, L. A.; ROBERTSON, G. W.: "Windbreaks and Shelterbelts". World Meteorological Organization. T.N. No. 59, pp. 9-17, Geneva, 1964.